

DIE ERDE

ZEITSCHRIFT DER GESELLSCHAFT FÜR ERDKUNDE ZU BERLIN

124. Jahrgang - 1993 - Heft 1

Herausgegeben durch

WOLF DIETER BLÜMEL (Stuttgart)

KARL LENZ (Berlin) - HARTMUT LESER (Basel)

KLAUS MÜLLER-HOHENSTEIN (Bayreuth) - FRED SCHOLZ (Berlin)

Unter Mitwirkung von

M.S. ABULEZZ (Kairo) - ST. HELMFRID (STOCKHOLM)

F. REITEL (Metz) - H. TH. VERSTAPPEN (Enschede)

H. WILHELMY (Tübingen)

Schriftleitung

KIRSTEN GEHRENKEMPER



GESELLSCHAFT FÜR ERDKUNDE ZU BERLIN

Gedruckt mit Förderung der Senatsverwaltung für Wissenschaft und Forschung

ISBN 3-87670-993-8

ISSN 0013-9998

Copyright 1993 by Gesellschaft für Erdkunde zu Berlin, D-1000 Berlin 41 (Steglitz), Arno-Holz-Straße 14.- Alle Rechte, auch die des auszugsweisen Nachdrucks, der photomechanischen Wiedergabe, der Herstellung von Mikrofilmen und der Übersetzung, vorbehalten.

Druck: Kahmann-Druck + Verlag GmbH, D - 1000 Berlin 37

Satz: Dr. K. Zillbach, D - 1000 Berlin 62

DIE ERDE	124	1993	S. 63 - 77	Regionaler Beitrag
----------	-----	------	------------	--------------------

• *Klimageographie - Klimaanomalien - Zirkulationsmuster*

Jucundus Jacobeit (Würzburg)

Regionale Unterschiede im atmosphärischen Zirkulationsgeschehen bei globalen Klimaveränderungen

Mit 4 Figuren

Anhand rezenter Beobachtungsdaten sollen Aussagen über die regional unterschiedlichen Zirkulationstendenzen erreicht werden, die sich bei globalen Klimaveränderungen ergeben. Dazu werden aus dem verfügbaren Beobachtungszeitraum 1947-1987 (eingeschränkt auf den nordhemisphärischen Winter) diejenigen Zeitabschnitte herausgegriffen und näher analysiert, die nicht nahe an den heutigen klimatischen Mittelwerten liegen, sondern signifikant davon abweichen und damit als rezente Repräsentationen eines geänderten Klimas aufgefaßt werden können. Als Selektionskriterium wird ein geeignetes Maß für das thermische Gefälle zwischen niederen und höheren Breiten herangezogen, die Untersuchung der zugehörigen Zirkulationsverhältnisse erfolgt über Hauptkomponentenanalysen der täglichen 500 hPa Geopotentialfelder. Die sich dabei ergebenden räumlich differenzierenden Zirkulationsmuster lassen sich verschiedenen Formen eines global geänderten Klimas zuordnen, etwaige zeitliche Entwicklungstendenzen ihres Auftretens ermöglichen regionalisierende Aussagen zum gegenwärtigen Klimawandel.

1. Einführung

Globale Klimaveränderungen sind von hervorhebener Bedeutsamkeit, weil sie die gesamte Geosphäre betreffen und dabei mit einem breiten Spektrum räumlicher Auswirkungsunterschiede verbunden sind. Dies gilt nicht nur für die makroskaligen Ereignisse, die uns aus der Klimageschichte bekannt sind, sondern auch für Klimaveränderungen rezenten Ausmaßes. Einen besonderen Akzent erhält dieser Umstand durch die Erkenntnis, daß neben natürlichen Ursachen wie Einstrahlungsschwankungen, stratosphärischem Vulkanstaub oder internen Schwankungen des Klimasystems auch der Mensch selbst an globalen Klimaveränderungen beteiligt ist, etwa durch die Freisetzung einer Vielzahl strahlungswirksamer Treibhausgase. Der Effekt auf die globale Mitteltemperatur in Bodennähe läßt sich aufgrund zahlreicher Modellrechnungen auch einigermaßen abschätzen - so wird etwa bei einer angenommenen Verdoppelung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration mit einer Erwärmung um $1.5\text{-}4.2^\circ\text{C}$ gerechnet (z.B. *Houghton,*

Jenkins und Ephraums 1990). Nur wenig ist jedoch bislang darüber bekannt, welche regionalen Unterschiede bei derartigen globalen Klimaveränderungen zu erwarten sind, auf welche unterschiedlichen Auswirkungen in verschiedenen Erdregionen man sich also gegebenenfalls einzustellen hat. Bedingt ist diese Fragestellung durch die Tatsache, daß jede globale Klimaveränderung mit Umstellungen in der atmosphärischen Zirkulation einhergeht, wodurch der Klimawandel räumlich differenziert wird und somit regionale Auswirkungsunterschiede entstehen.

Zur Erfassung derartiger Unterschiede stehen uns prinzipiell die Vorgehensweisen modelltheoretischer Simulationen sowie empirischer Analogiestudien zur Verfügung. Der erste Weg zeichnet sich durch (exakte oder näherungsweise) Formulierungen physikalischer Gesetzmäßigkeiten aus, hinterläßt aber (trotz bereits hoher Komplexitätsgrade) bei der Annäherung an die Wirklichkeit immer wieder teils erhebliche Defizite. Der zweite Weg vermag zwar keine strengen Beweisführungen zu liefern, be-

zieht jedoch seine Argumentationskraft aus der substantiellen Bindung an tatsächliche Zustandsformen oder Entwicklungstendenzen. Im folgenden soll dieser zweite Weg beschritten werden, wobei allerdings keine Analogiebildung mit paläoklimatischen Zeitabschnitten angestrebt wird, sondern auf der Basis rezenten Datenmaterials Informationen über das atmosphärische Zirkulationsgeschehen gewonnen werden sollen, die potentielle Bedeutsamkeit für die regional differenzierte Ausgestaltung globaler Klimaveränderungen haben.

Als Datenbasis können wir auf mehr als vier Jahrzehnte umfassende tägliche Bodenluftdruck- und 500 hPa Geopotentialfelder der Nordhemisphäre zurückgreifen, die in einem 5°-Standardgitternetz vorliegen. Inhaltliches Ziel ist es allgemein, das Verhalten der Atmosphäre zu räumlichen Grundmustern der Zirkulation zu verdichten, die jeweils für unterschiedliche Zeitabschnitte kennzeichnend sind. Da wir uns für veränderte Klimaverhältnisse interessieren, sind nun gerade nicht diejenigen Zeitabschnitte von Bedeutung, die nahe an den heutigen klimatischen Mittelwerten liegen, sondern diejenigen, die signifikant davon abweichen. Derartige klimatische Anomalien können gewissermaßen als rezent Abbild eines geänderten Klimas aufgefaßt werden, das atmosphärische Zustandsformen, die heute nur als gelegentliche Anomalien in Erscheinung treten, als gehäufte oder gar bestimmende Phänomene beinhaltet. Regional differenzierte Zirkulationsmuster, die im Kontext globaler Klimaveränderungen an Bedeutung gewinnen können, werden also gerade aus rezenten Anomaliephasen abgeleitet, wobei wir uns im folgenden auf den nordhemisphärischen Winter (die Jahreszeit mit den häufig stärksten Signalen) konzentrieren werden und zunächst die Frage nach einer geeigneten Selektion derartiger Klima-anomalien zu beantworten haben.

2. Zur Selektion rezenter klimatischer Anomalien

Ein entscheidender Parameter der atmosphärischen Zirkulation ist der meridionale Temperaturgradient zwischen niederen und höheren

Breiten, von dem u.a. die großräumige Zirkulationsintensität, die mittlere Breitenlage der Klimazonen und die allgemeine Zirkulationsform abhängig sind. Im Zuge globaler Klimaveränderungen wird sich meist auch dieser meridionale Temperaturgradient verändern: so wissen wir z.B., daß die Schwankungen der bodennahen Lufttemperatur in höheren Breiten eine größere Amplitude besitzen als in niederen Breiten, also etwa bei globalen Erwärmungen eine Abnahme des meridionalen Temperaturgradienten in Bodennähe erfolgt (*Schönwiese* 1991: 76). Andererseits hat bereits *Miles* (1975) dargelegt, daß die Zirkulationsintensität nicht vom meridionalen Temperaturgradienten in Bodennähe, sondern in einer hinreichend mächtigen Troposphärenschicht abhängt. Also können mittel- oder hochtroposphärische Gegebenheiten auch ein andersartiges Gesamtbild erzeugen. So weist etwa *Flohn* (1989) darauf hin, daß mit der erwärmungsbedingten Verdunstungszunahme der letzten Jahrzehnte vor allem in der mittleren Troposphäre der Tropen eine verstärkte latente Energiefreisetzung stattfindet und so der meridionale Temperaturkontrast zu den höheren Breiten im Zuge der globalen Erwärmung nicht ab-, sondern zunimmt (*Flohn, Kapala, Knoche und Mächel* 1990).

Unabhängig vom Vorzeichen seiner zeitlichen Änderung in unterschiedlichen Höhen oder Schichten repräsentiert der jeweilige meridionale Temperaturgradient jedenfalls einen gesamthemisphärischen klimatischen Zustand, so daß seine zeitlich variablen Werte zur Bestimmung klimatischer Anomalien herangezogen werden können, die uns als rezent Abbild eines geänderten Klimas dienen (*Kap. 1*).

Da für die vorliegende Untersuchung nordhemisphärische Gitternetzfelder von Bodenluftdruck und 500 hPa-Geopotential zur Verfügung stehen, soll der meridionale Temperaturkontrast über den Gradienten der 500/1000 hPa-Schichtdicke bestimmt werden, die als Maß für die Temperatur der betreffenden Luftschicht angesehen werden kann. Die Gitternetzfelder in einheitlicher 5°-Auflösung beginnen bei 20°N, so daß hemisphärisch gemittelte Gradienten zwischen den Breitenstreifen 20°

35°N und 55-70°N zugrundegelegt wurden. Die verfügbare Zeitspanne umfaßt 41 Winterjahreszeiten (Dez.-Feb.) zwischen 1947 und 1987, wobei die Jahreszahl sich jeweils auf den Zentralmonat bezieht.

In *Fig. 1* sind die standardisierten Abweichungen dieses Meridionalgradienten vom zugehörigen Mittelwert auf jahreszeitlicher Basis wiedergegeben. Als rezentos Abbild eines geänderten Klimas können die anomalen Winter mit signifikant über- oder unterdurchschnittlichen Gradienten aufgefaßt werden. Legt man die Anomaliegrenze beim Niveau der Standardabweichung fest, (das als Begrenzung des sog. 'Hintergrundrauschens' gelten kann,) so erhält man im betrachteten Zeitraum 12 anomale Winterjahreszeiten (5 mit positivem, 7 mit negativem Vorzeichen), die im weiteren Gegenstand eingehenderer Untersuchung sein werden.

3. Zur Bestimmung atmosphärischer Zirkulationsmuster

3.1 Methodik

Um Aufschluß über die nordhemisphärischen Zirkulationsverhältnisse während der genannten anomalen Winterjahreszeiten zu erhalten, wird die multivariate Methode der Hauptkomponentenanalyse auf die verfügbaren Datensätze (Bodenluftdruck bzw. 500 hPa Geopotential) angewandt. Dadurch gelingt es, aus der Vielzahl einzelner Gitternetzfelder einige wenige charakteristische Verteilungsmuster herauszukristallisieren, die den größten Teil der involvierten Varianz erklären und die wesentlichen Ausprägungsmomente der originalen Gitternetzfelder in verdichteter Form zusammenfassen (siehe in ausführlicher Erörterung bei *Jacobeit* 1989: 109 ff.). Die vorliegende Fragestellung führt zum sog. T-Modus der Hauptkomponentenanalyse, bei dem die zeitverschiedenen Gitternetzfelder der untersuchten Größe als Variable, die zugrundeliegenden Gitterpunkte als Ereignisfälle eingehen. Dementsprechend erbringen die resultierenden Hauptkomponentenwerte die räumlichen Grundmuster der Zirkulation, die Hauptkomponentenladungen deren zeitliche Gewichtungsko-

effizienten. Faßt man diese über längere Zeiträume zusammen (als pragmatische Einheit soll im weiteren der Monat festgelegt sein), ergeben sich unterschiedliche Bedeutsamkeiten der Grundmuster in verschiedenen Monaten, was als kennzeichnender Unterschied in den jeweiligen Zirkulationsverhältnissen interpretiert werden kann.

Um diese variablen Gewichtungen unter Signifikanzgesichtspunkten beurteilen zu können, sind die monatsgemittelten Quadrate der Ladungen - sie geben den monatsbezogenen Varianzerklärungsanteil der Hauptkomponenten wieder - in zweierlei Hinsicht standardisiert worden: zum einen bezüglich aller monatlichen Varianzerklärungsanteile der betreffenden Hauptkomponente (S1-Wert), wodurch deren besonderes Hervortreten im zwischenmonatlichen Vergleich bestimmt werden kann, zum anderen bezüglich der Varianzerklärungsanteile aller extrahierten Hauptkomponenten im betreffenden Monat (S2-Wert), wodurch die Repräsentanz im innermonatlichen Vergleich zum Ausdruck gelangt. Da bei beiden Werten jeweils nur das positive Hervortreten einer Hauptkomponente sinnhaft interpretierbar ist (negatives Zurücktreten dokumentiert lediglich fortschreitende Bedeutungslosigkeit), genügt bei der Signifikanzbeurteilung die einseitige Fragestellung.

Von den durchgeführten Analysen werden hier nur die Ergebnisse im 500 hPa-Niveau vorgestellt, da sie für die großräumige Steuerung die maßgeblichen sind und mit über 90% auch um rund 30% höhere Gesamtvarianzerklärungsanteile erbringen als im wesentlich ungleichförmigeren Bodenniveau. Um die Variablenzahl auf ein vertretbares Verhältnis zur Fallanzahl zu begrenzen, sind die täglichen Geopotentialfelder der 12 anomalen Winterjahreszeiten aus *Fig. 1* jeweils zu pentadengemittelten Feldern zusammengefaßt worden. Nach einfachstrukturierender Orthogonalrotation erhält man gerade 4 Hauptkomponenten, wenn man die Extraktion dort abbricht, wo kein Wertepaar $S1 > 1$ und $S2 > 1$ mehr auftritt, also auf Monatsbasis keine Repräsentanz mehr über dem Niveau des Hintergrundrauschens gegeben ist. Dieses bemerkenswerte Resultat von nur 4

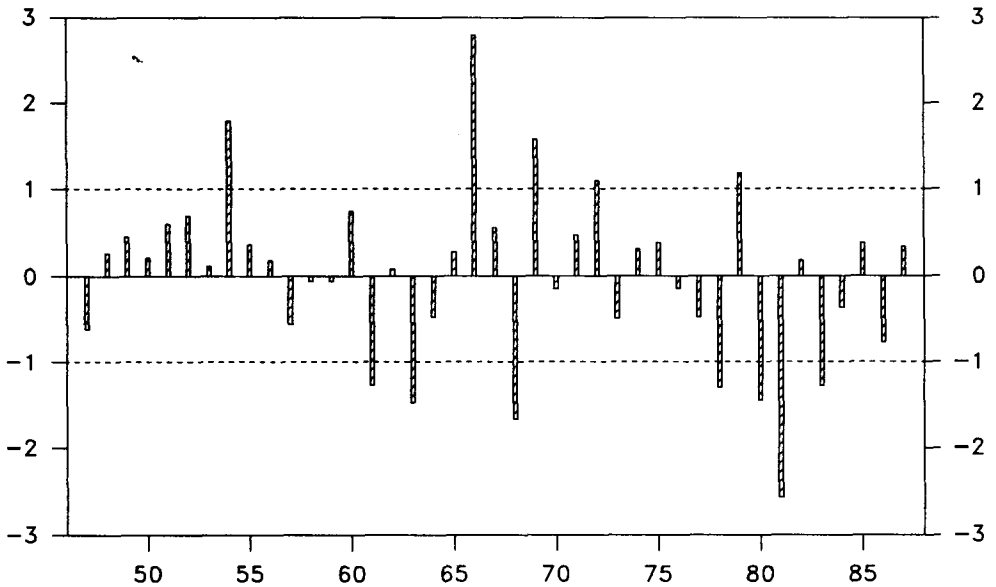


Fig. 1. Standardisierte Abweichungen des hemisphärischen Meridionalgradienten der winterlichen 500/1000 hPa Schichtdicke zwischen den Breitenzonen 20-35°N und 55-70°N vom Wintermittelwert 1947-1987 / *Standardized deviations of the hemispheric meridional gradient of the wintertime 500/1000 hPa thickness between the latitudinal bands 20-35°N and 55-70°N referring to the mean of winters 1947-1987*

Hauptkomponenten zeigt aufgrund der immer noch hohen Variablenzahl aber noch keine hinreichende Prägnanz: so muß eine bestimmte Strömungskonfiguration, die in einer Jahreszeit bestimmend hervortritt, nicht über deren gesamte Andauerzeit hinweg gleichermaßen deutlich ausgebildet sein. Deshalb ist die Analyse mit repräsentierenden Monaten stärkster Anomaliebetonung in den einzelnen Jahreszeiten wiederholt worden. Dadurch wird einerseits die erforderliche Ergebnisprägnanz erreicht, ohne andererseits das Prinzip der Erfassungsvollständigkeit zu verletzen (d.h. aufgrund der ersten vollständigen Analyse ist gewährleistet, daß keine weiteren Grundmuster übersehen werden, die dem ausgesonderten Variablenteil entstammen könnten).

3.2 Zuordnung

Fig. 2 zeigt die S1- und S2-Werte für die 4 Hauptkomponenten und die repräsentierenden Monate der anomalen Winterjahreszeiten, die zu zwei gradientbezogenen Gruppen zusammengefaßt sind (starkgradientige Zeitabschnitte

jeweils im linken, schwachgradientige im rechten Diagrammteil). Man erkennt deutlich das gruppenspezifische Hervortreten der Hauptkomponenten: 2 und 3 in gradientverstärkten, 1 und 4 in gradientabgeschwächten Jahreszeiten. Dabei erreichen in der ersten Gruppe vier von fünf Repräsentanzmonaten im S1-Wert die 95% Signifikanzschwelle, der fünfte bleibt zumindest (wie auch alle anderen bei den entsprechenden S2-Werten) über dem Niveau der Standardabweichung. In der zweiten Gruppe tritt Hauptkomponente 4 als regelrechte Ausnahmeerscheinung nur in einer einzigen Jahreszeit signifikant hervor, während Hauptkomponente 1 in den schwachgradientigen Zeitabschnitten ein häufiger akzentuiertes Phänomen zu sein scheint; dabei übersteigt im S1-Wert zwar nur ein einziger Fall die 95% Signifikanzschwelle, aber alle entsprechenden S2-Werte liegen zumindest über dem Niveau der Standardabweichung. Somit kann also festgehalten werden, daß sich verschiedene Grundmuster der Zirkulation unterschiedlichen klimatischen Anomalien zuordnen lassen, zumindest insofern, als Grundmuster, die während einer bestimmten Anomalie stärker akzentuiert

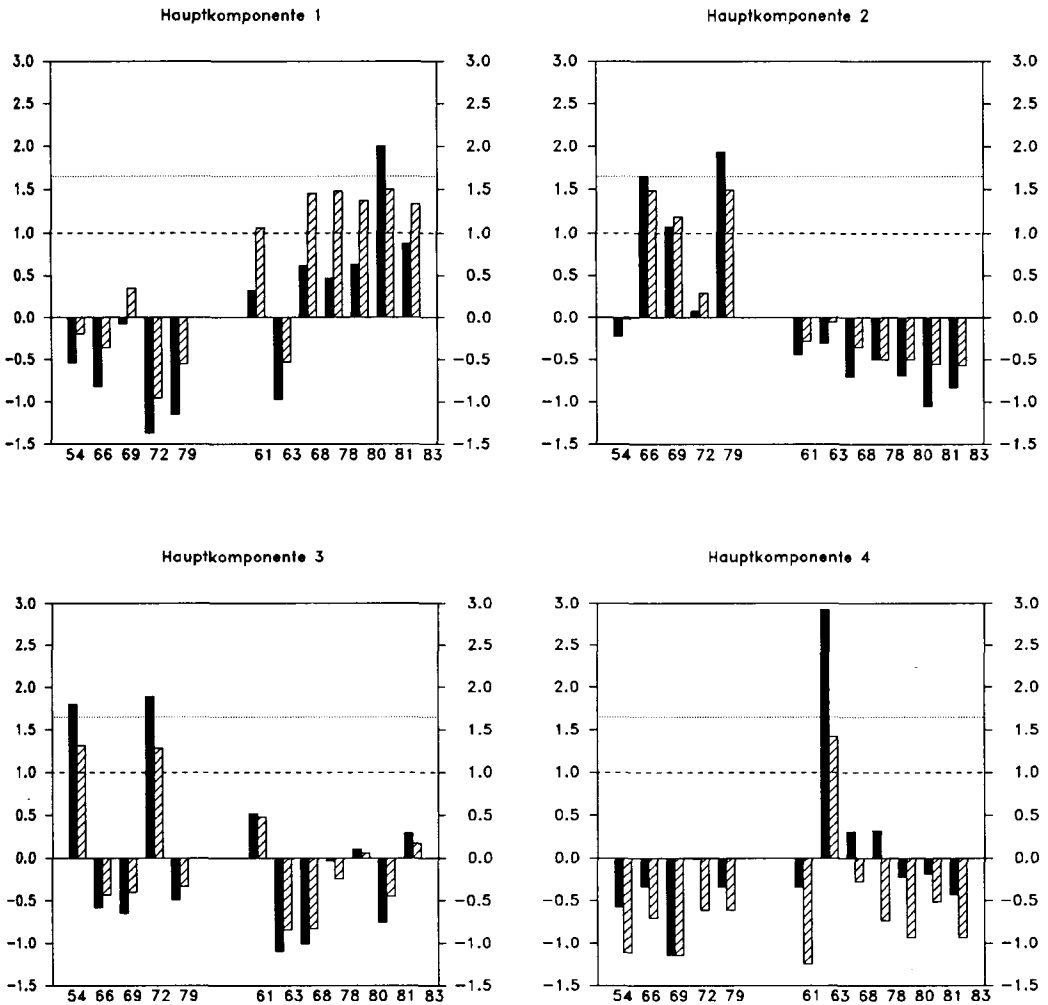
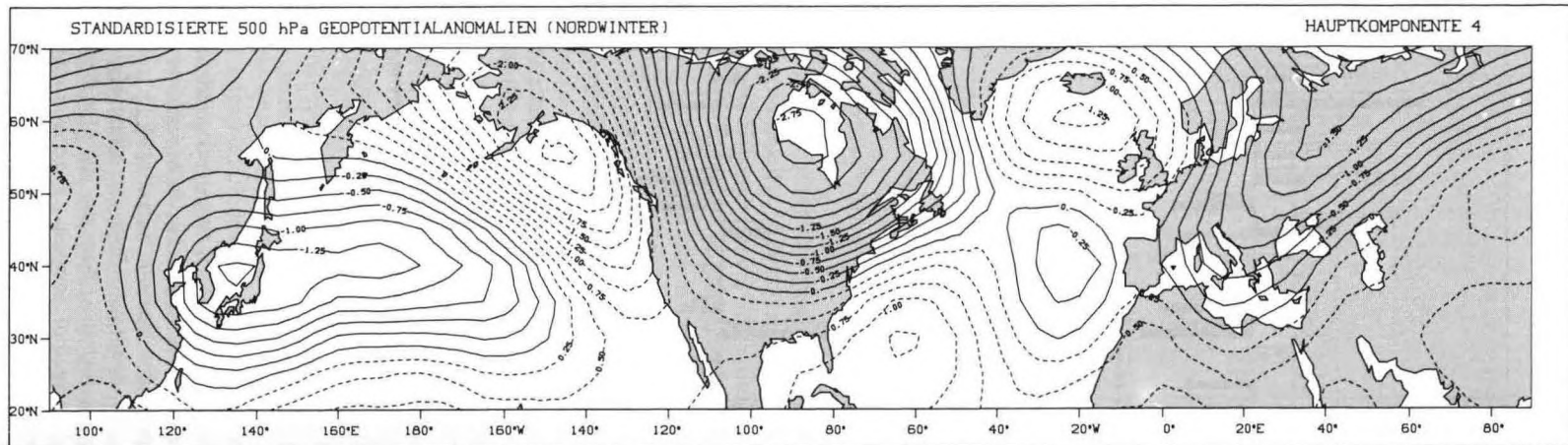
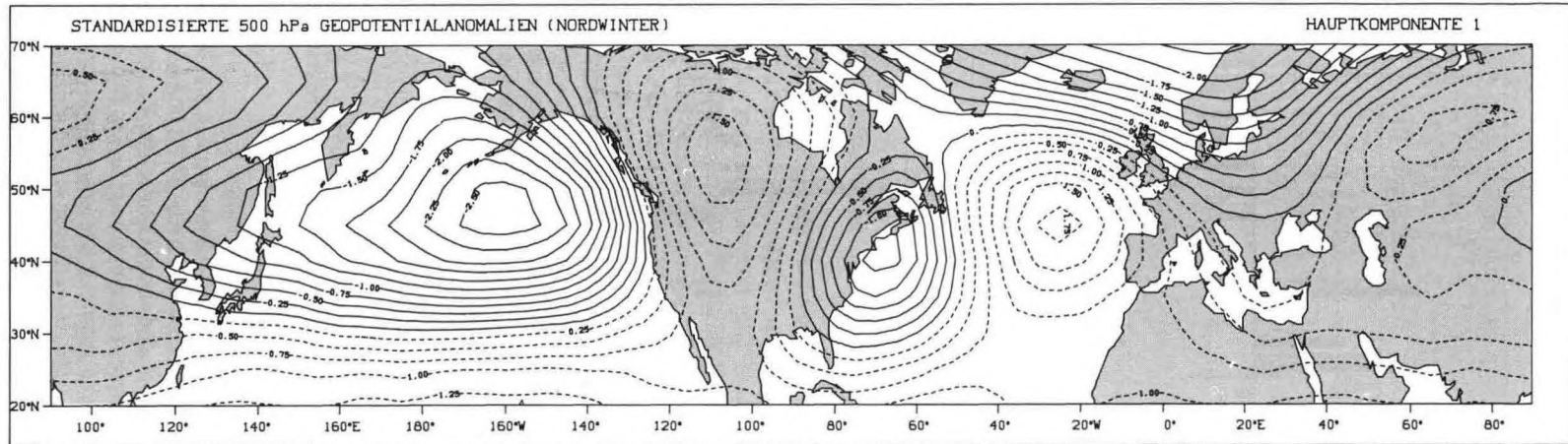
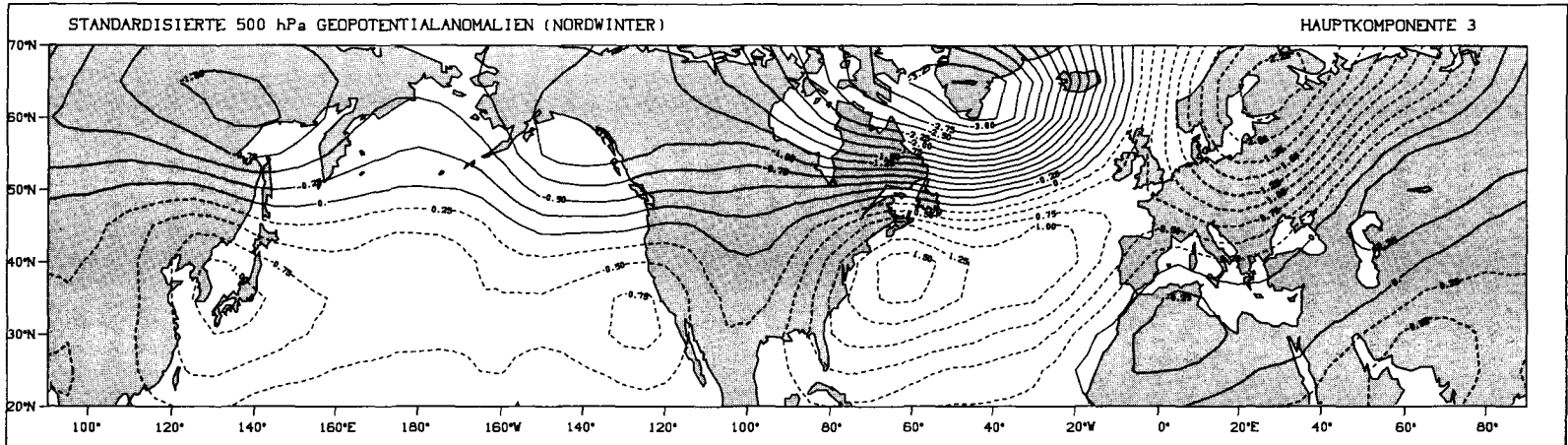
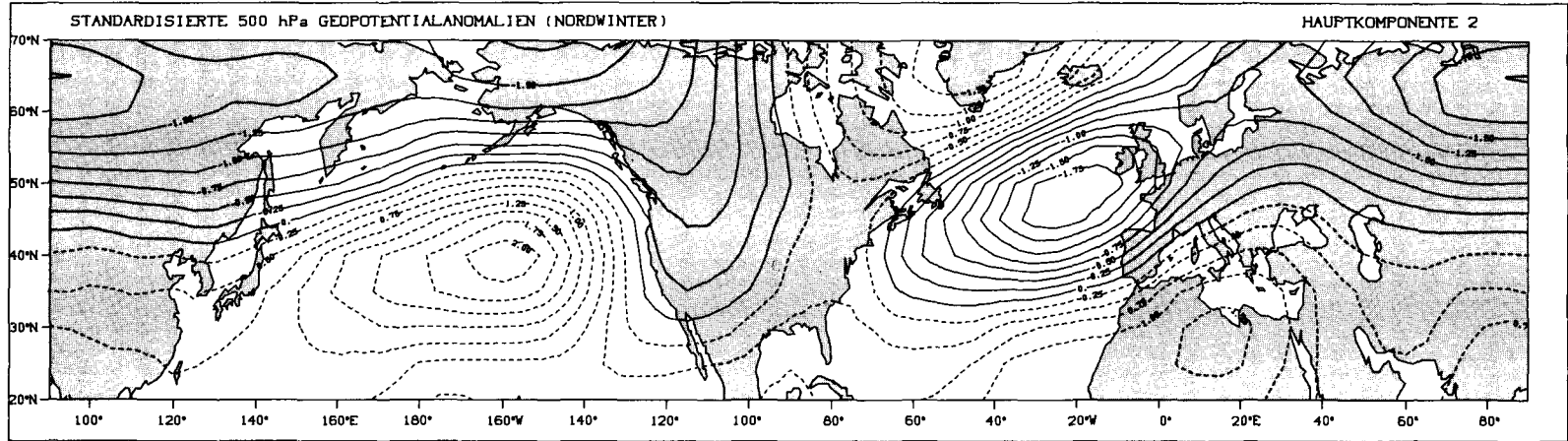


Fig. 2. Standardisierte monatgemittelte Varianzerklärungsanteile der ersten vier Hauptkomponenten aus den 500 hPa Geopotentialfeldern repräsentativer Monate der anomalen Winterjahreszeiten aus Fig. 1 (Winter des Zeitraums 1947-1987 mit Werten >1 laut Fig. 1 sind jeweils im linken Diagrammteil, solche mit Werten <-1 laut Fig. 1 jeweils im rechten Diagrammteil aufgeführt). S1-Wert schwarz, S2-Wert schraffiert (Erklärung siehe Text). Die gepunktete Linie markiert das 95%-Signifikanzniveau / Standardized values of monthly averaged variances explained by the first four principal components derived from the 500 hPa flow during representing months of the anomalous seasons from Fig. 1 (winters of the period 1947-1987 with values >1 according to Fig. 1 are specified on the left side of the diagrams, those with values <-1 according to Fig. 1 on the right side). Black bars: referring to all representing months. Hatched bars: referring to all principal components. The dotted line marks the 95% significance level

Fig. 3. Standardisierte Werte (>0 gestrichelt) der ersten vier Hauptkomponenten aus den 500 hPa Geopotentialfeldern repräsentativer Monate der anomalen Winterjahreszeiten aus Fig. 1. Es sind jeweils die Hauptkomponenten mit Hervortreten in gradientverstärkten bzw. gradientabgeschwächten Zeitabschnitten (vgl. Fig. 2) auf einer Seite zusammengefaßt / Standardized scores (>0 dashed) of the first four principal components derived from the 500 hPa flow during representing months of the anomalous seasons from Fig. 1. Principal components accentuated during periods with strengthened or reduced gradients, respectively (see Fig. 2), are shown on one page





hervortreten, es nicht gleichermaßen auch während der entgegengesetzten Anomalie vermögen.

3.3 Raummuster

Fig. 3 zeigt uns die räumlichen Verteilungsmuster der resultierenden Hauptkomponentenwerte, dargestellt als Isohypsenfelder standardisierter Geopotentialanomalien. Hauptkomponente 2 und 3, die in gradientverstärkten Zeitabschnitten hervortreten, lassen übereinstimmend eine weiträumig zonalisierte Zirkulationsform erkennen mit markanten regionalen Ausnahmen über Nord- und Mitteleuropa bzw. im Längenbereich von Labrador-Grönland. Beide Zirkulationsmuster können als entgegengesetzte Phasen der sog. 'Nordatlantischen Oszillation' (NAO) aufgefaßt werden, die als Grundmodus mitteltroposphärischer Variabilität aus zahlreichen Zirkulationsstudien bekannt ist (Wallace und Gutzler 1981; Horel 1981; Mo und Livezey 1986; Barnston und Livezey 1987). Konstituierend für sie ist der Breitenpositionswechsel von negativen und positiven Geopotentialanomalien im nordatlantischen Längenbereich, wie er sich auch zwischen Hauptkomponente 2 und 3 erkennen läßt. Bemerkenswert im vorliegenden Zusammenhang ist darüberhinaus die nordeuropäische Antizyklonalanomalie bei der positiven NAO-Phase (Hauptkomponente 3) sowie die Tatsache, daß beide entgegengesetzten NAO-Phasen in gesamthemisphärisch zonalisierten Zirkulationsformen auftreten und sich generell gradientverstärkten Zustandsformen zuordnen lassen.

Die beiden Zirkulationsmuster mit gesteigerter Akzentuierung in schwachgradientigen Jahreszeiten (Hauptkomponente 1 und 4) zeigen dagegen meridionalisierte Zirkulationsformen mit großamplitudigen Wellen und bedeutenden regionalen Unterschieden im Strömungsregime. Hauptkomponente 4 mit ihrem dreizahligen Wellenmuster erinnert dabei sehr nachhaltig an Strömungskonfigurationen, wie sie paläoklimatologisch für glaziale (d.h. inlandeisaufbauende) Verhältnisse angenommen werden (Flohn 1969). Sie tritt im rezenten Datenmaterial auch

gerade nur im Winter 1963 hervor, der ja in Mitteleuropa als außerordentlich streng bekannt geblieben ist. Hauptkomponente 1 ähnelt dagegen dem sog. PNA-Muster ('Pacific/North American pattern', Barnston und Livezey 1987), das durch negative Geopotentialanomalien im pazifischen Großraum und über dem südöstlichen Nordamerika sowie positive Anomalien über Nordwestamerika gekennzeichnet ist und eine gewisse Auftretsbegünstigung bei äquatorialpazifischen El-Niño-Ereignissen erfährt (Yarnal 1985). Hauptkomponente 1 zeigt darüberhinaus ein Antizyklonalzentrum über dem mittleren Nordatlantik, einen stark abgeschwächten europäischen Höhentrog bei kräftiger Westdrift über Nordeuropa sowie schwachen Hochdruckeinfluß über Zentralasien.

Insgesamt erbringt die Analyse also Grundmuster der Zirkulation, die in ähnlicher Gestalt auch aus anderen Zusammenhängen her bekannt sind, im vorliegenden Kontext jedoch gerade während bestimmter klimatischer Anomalien (repräsentiert durch unterschiedliche meridionale Temperaturkontraste) stärker akzentuiert hervortreten.

3.4 Überprüfung

Kritisch bei abstrahierenden Hauptkomponentenanalysen bleibt immer die nicht von vornherein zu entscheidende Frage, inwieweit die Ergebnisse der numerischen Umformungen rein fiktiv bleiben oder als Manifestationen tatsächlicher atmosphärischer Prozesse aufgefaßt werden können. Eine Möglichkeit der Beurteilung besteht darin, charakteristische Eigenschaften der Zirkulationsmuster in den originalen Geopotentialfeldern derjenigen Zeitabschnitte wiederzufinden zu versuchen, die eine erkennbare Akzentuierung der betreffenden Hauptkomponente ausweisen. Hierfür kann die harmonische Analyse herangezogen werden, mit der sich das zirkumpolare Geopotential eines Breitenbereichs in harmonische Teilschwingungen zerlegen läßt, um zu einer Beurteilung der vorherrschenden Wellenstruktur zu gelangen. So sind im Breitenstreifen von 40-50°N für alle winterlichen Pentaden im Gesamt-

zeitraum 1947-1987 harmonische Analysen des 500 hPa Geopotentials durchgeführt und Mittelungen der bedeutsamsten Schwingungsamplituden für jeweils alle Monate berechnet worden, die in *Fig. 2* hinsichtlich einer bestimmten Hauptkomponente S1- oder S2-Werte über dem Niveau der Standardabweichung ergeben haben.

Die wichtigsten Ergebnisse lassen sich wie folgt zusammenfassen: in den gradientverstärkten Zeitabschnitten dominieren weitgehend geringe Amplituden, die sich bei der Hauptkomponentenanalyse im vorherrschend zonalisierten Strömungscharakter der assoziierten Zirkulationsmuster 2 und 3 niederschlagen. Im Winter 1963 wird - in Übereinstimmung mit Hauptkomponente 4 - die Wellenzahl 3 primär bestimmend (zirkumpolare Schwingung mit 3 Maxima und Minima). Die übrigen gradient- abgeschwächten Zeitabschnitte zeigen neben einer gewissen regionalisierenden Betonung von Wellenzahl 4 vor allem ein signifikantes Hervortreten von Wellenzahl 1, das sich im charakteristischen Gegensatz zwischen Pazifik und Atlantik bei der assoziierten Hauptkomponente 1 widerspiegelt. Insgesamt kann also von einem realen Bezug der hauptkomponentenanalytischen Zirkulationsmuster zu den Strömungsverhältnissen der Zeitabschnitte ihrer numerischen Akzentuierung ausgegangen werden.

4. Folgerungen im Kontext von Klimaveränderungen

Wie sich die aus rezenten Anomalien abgeleiteten Zirkulationsmuster ins Klimaveränderungsgeschehen einordnen lassen, soll im folgenden nach Hauptkomponenten gesondert erörtert werden.

a) Hauptkomponente 1

In ihrem Zusammenhang sind Ergebnisse von besonderer Bedeutsamkeit, die *Flohn* (1989) vorgestellt hat: danach hat von 1967 bis 1985 im Winterhalbjahr die geostrophische Höhenwestwindkomponente über dem Pazifik in subtropischen Breiten zu- und in subpolaren abgenommen, über dem Atlantik dagegen in den höheren Mittelbreiten zu- und in den niederen

abgenommen. *Flohn* (1989) führt diese Entwicklung auf den anthropogenen CO₂-Anstieg als Auslöser und höchst effektive H₂O-Umsetzungen als verstärkende Rückkopplungsprozesse zurück: dabei wird im Gefolge der erwärmungsbedingten Verdunstungszunahme vor allem über den sog. 'warmen Ozeanen' (Ost-Indik und West-Pazifik) in der mittleren Troposphäre der Tropen eine verstärkte Freisetzung latenter Energie induziert, die den (sub-) polaren Eis-Albedo-Temperatur-Rückkopplungseffekt noch übertrifft (*Schlesinger* 1986). Dies führt zu einer Verschärfung des meridionalen Temperaturgefälles und zumindest im Längenbereich der primären Wärmequellen zu einer Zirkulationsintensivierung (siehe auch *Flohn* 1986: 146). Nicht gänzlich geklärt sind dadurch jedoch schon alle genannten regionalen Unterschiede zwischen Pazifik und Atlantik. Blikken wir dagegen auf die räumlichen Geopotentialverteilungen der Hauptkomponentenanalyse (*Fig. 3*), so erkennen wir gerade im Zirkulationsmuster von Hauptkomponente 1 eine allseits damit vereinbare Strömungskonfiguration: bei gesteigerter Repräsentanz im realen Geopotentialfeld impliziert sie verstärkte Westwinde auf der äquatorwärtigen, abgeschwächte auf der polwärtigen Seite der umfassenden pazifischen Zyklonalanomalie sowie verstärkte Westkomponenten nördlich und abgeschwächte südlich der mittelatlantischen Antizyklonalanomalie.

Inkonsistent erscheint allerdings zunächst noch der Umstand, daß *Flohns* Befunde im Zusammenhang mit einem verschärften meridionalen Temperaturkontrast gesehen werden, während Hauptkomponente 1 ganz unverkennbar mit einem reduzierten assoziiert ist (vgl. Kap. 3.2). Diese Inkonsistenz löst sich jedoch auf, wenn man Ergebnisse eines neueren allgemeinen Zirkulationsmodells von *Wilson und Mitchell* (1987: 13, 327) in die Betrachtung miteinbezieht: die simulierte Temperaturveränderung nach einer angenommenen CO₂-Verdopplung zeigt nämlich bei meridionaler und vertikaler Auflösung eine polwärtige Zunahme der Erwärmung nicht nur in Bodennähe, sondern im gesamten unteren Teil der Troposphäre einschließlich der 500/1000 hPa-Schicht, also eine Abnahme des meridionalen Temperaturgefäl-

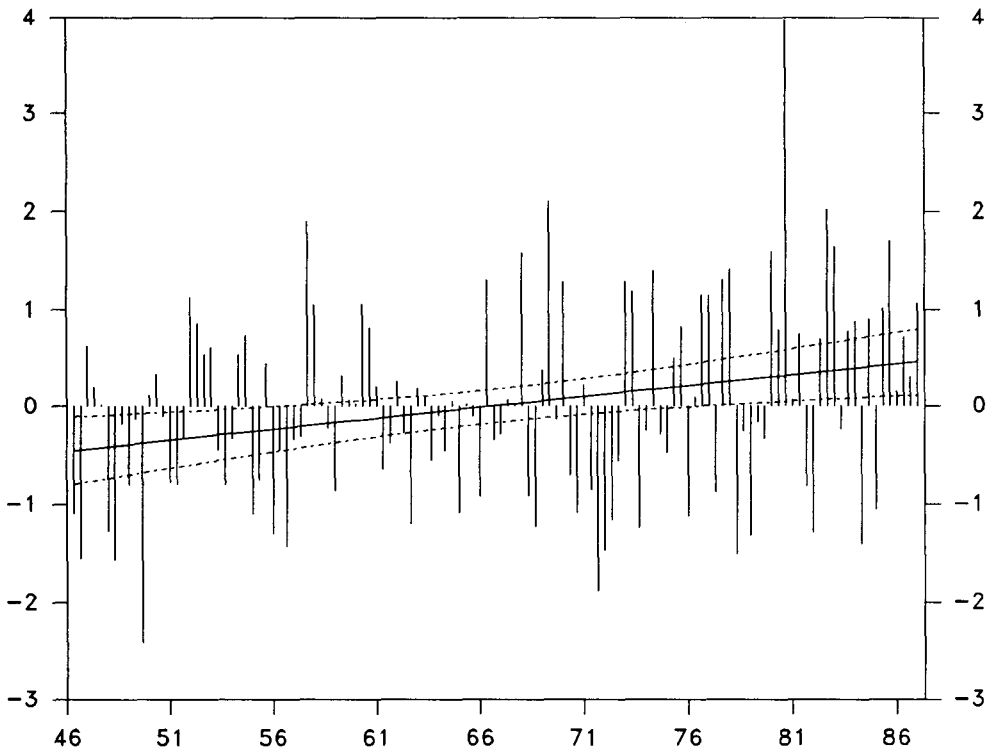


Fig. 4. Standardisierte monatsgemittelte Varianzerklärungsanteile von Hauptkomponente 1 an den 500 hPa Geopotentialfeldern aller Wintermonate von 1947 bis 1987 - Regressionsgerade mit 95%-Vertrauensbereich / *Standardized values of monthly averaged 500 hPa flow variances explained by principal component 1 during all winter months from 1947 to 1987 - linear regression with 95% confidence limits*

les, während sich erst im oberen Teil eine Zunahme aufgrund maximaler Erwärmung über den Tropen einstellt. Ungeachtet des Umstands, daß bei empirischen Auswertungen eine generell niedrigere Obergrenze troposphärischer Erwärmungen bei etwa 300 hPa festgestellt worden ist (Angell 1986), lassen sich also die genannten (scheinbaren) Gegensätze durch vertikale Differenzierung miteinander vereinbaren. Die erhöhten Gradienten in der oberen Troposphäre dürften sogar maßgeblich dafür sein, daß sich trotz reduzierter Kontraste in der unteren Troposphäre immer wieder eine mitteltroposphärische Zirkulationsform mit beachtlichem Meridionalaustausch wie in Hauptkomponente 1 herausbildet.

Neben der räumlichen Vereinbarkeit mit unabhängig erzielten Resultaten fügt sich jedoch auch die zeitliche Repräsentanzentwicklung

von Hauptkomponente 1 in ein konsistentes Gesamtbild ein. Betrachten wir ihre monatlich gemittelten Varianzerklärungsanteile für alle 123 Wintermonate von 1947 bis 1987 (Fig. 4), so erkennen wir neben den dominanten interannuellen und intrasaisonalen Schwankungen auch einen überlagerten Anstiegstrend, der zwar nur 7% der Zeitreihenvarianz erklärt, aber mit 95% Sicherheit statistisch signifikant ist (vgl. den entsprechenden Vertrauensbereich in Fig. 4). Da die Residuen der linearen Regression normalverteilt und stochastisch unabhängig sind, können die Voraussetzungen der Regressionsanalyse auch als erfüllt angenommen werden (Bahrenberg, Giese und Nipper 1990: 157f.). Inhaltlich bedeutet der nachgewiesene Anstiegstrend, daß sich der durch Hauptkomponente 1 erklärbare Anteil an der Varianz der winterlichen Geopotentialfelder in den betrachteten vier Jahrzehnten um fast 13% erhöht hat,

nämlich von 21.6% auf 34.4%, also bereits gegenwärtig eine gestiegene Repräsentanz dieses Zirkulationsmusters konstatiert werden kann. Da die (hier nicht abgebildeten) Zeitreihen der übrigen Hauptkomponenten keinen Anstiegstrend zeigen (diejenigen der zonalisierten Muster 2 und 3 sogar eher einen fallenden Trend, der allerdings statistisch nicht signifikant ist), muß im Zuge dieser Entwicklung mit einer Zunahme regional unterschiedlicher Phänomene gerechnet werden, wie sie sich aus dem räumlichen Verteilungsbild von Hauptkomponente 1 (Fig. 3) ergeben: verstärkte zyklonale Aktivität im pazifischen Großraum und an der Ostseite Nordamerikas, steigender Antizykloneinfluß über Nordwestamerika, dem mittleren Nordatlantik und Zentralasien, verstärkte Westdrift über dem nördlichen Nordatlantik und Nordeuropa sowie ein abgeschwächter europäischer Höhentrog. In dieses Bild fügen sich auch die von *Knoche* (1991) festgestellte Verstärkung des Islandtiefs und die von *Perry* (1990) konstatierte Veränderung im Antizyklonalregime Westeuropas ein (Rückgang im *blocking* hoher Breiten und Luftdruckanstieg in mittleren Breiten).

Insgesamt liefert also Hauptkomponente 1 in ihrem räumlichen Verteilungsmuster und in ihrer zeitlichen Repräsentanzentwicklung eine zirkulationsbezogene Verständnissynthese für regional unterschiedliche Phänomene im Kontext der rezenten globalen Erwärmung. Selbst der jüngere Rückgang bei größeren äquatorialpazifischen Kaltwasserereignissen (*Hense, Krahe und Flohn* 1988: 226) ist angesichts der erwähnten Affinität des PNA-artigen Zirkulationsmusters von Hauptkomponente 1 zu großräumigen El-Niño-Ereignissen zumindest qualitativ damit vereinbar. Bei einer weiteren globalen Erwärmung kann also mit einer Zunahme regionaler Anomalien im Anordnungsmuster von Hauptkomponente 1 gerechnet werden.

b) Hauptkomponente 4

Sie verkörpert im Gegensatz dazu Zirkulationstendenzen, wie sie sich bei massiven Abkühlungen manifestieren ('glaziale Strömungskonfiguration') und unter heutigen Bedingungen nur in Ausnahmesituationen (Winter 1963) voll

ausgebildet zu erwarten sind. Reduzierte meridionale Temperaturkontraste treten auch nur zwischen subtropischen und subpolaren Breitenbereichen auf, die (hier nicht miteinbezogene) Polarkappe dagegen tendiert besonders kalt zu sein und dadurch doch noch starke Meridionalkontraste zu erzeugen (kräftiger Austausch in großamplitudigen Wellen). Oberhalb der 500/1000 hPa-Schicht können die Meridionalgradienten jedoch durchaus wieder reduziert sein, wie es sogar für glaziale Verhältnisse simuliert (*Williams* 1975) und schon von *Kraus* (1973) postuliert worden ist (gestützt auf die Höhenbegrenztheit polarer Eis-Albedo-Temperatur-Rückkopplungen und den vor allem in den Tropen wirksamen Verstärkungsprozeß thermischer Veränderungen durch die exponentiell temperaturabhängige Freisetzung latenter Energie in der oberen Troposphäre). Gewissermaßen herrschen also genau entgegengesetzte Verhältnisse wie im globalen Erwärmungsfall (verstärkte statt abgeschwächter Meridionalgradienten im unteren Teil der Troposphäre, abgeschwächte statt verstärkter dagegen im oberen Teil). Als charakteristische Begleiterscheinung ergibt sich eine Meridionalzirkulation mit Höhenträgen über Nordamerika, Europa und dem Westpazifik sowie dazwischengelagerten Antizyklonalwellen (Hauptkomponente 4).

c) Hauptkomponenten 2 und 3

Diese beiden zonalisierten Strömungsmuster mit Ähnlichkeit zu verschiedenen Phasen der Nordatlantischen Oszillation sind hemisphärisch mit verstärkten Meridionalgradienten in der 500/1000 hPa-Schicht assoziiert (vgl. Kap. 3.2), wie sie im Zusammenhang mit subpolaren Abkühlungen oder subtropischen Erwärmungen entstehen können. Als hypothetische Ursachen kommen im ersten Fall kumulativ polwärts konvergierende stratosphärische Vulkanstäube in Frage, im zweiten Fall (allerdings nicht hinreichend abgesicherte) Solarstrahlungsveränderungen. Die Verstärkung der meridionalen Temperaturkontraste darf jedoch nur soweit gehen, wie es mit einer zwar ebenfalls verstärkten, aber dennoch austauschbegrenzten Zonalzirkulation noch vereinbar ist. Bei weiter steigenden Kontrasten vollzieht sich ab bestimmten Schwellenwerten ein Übergang zu austauschwirksameren meridionalen Zirkulations-

formen, die nach den vorliegenden Ergebnissen in Richtung der Anordnungsmuster von Hauptkomponente 4 (globale Abkühlung) bzw. 1 (globale Erwärmung) orientiert sind. Unterhalb dieser Schwellenwerte bildet sich jedoch bei begrenzt verstärkten Meridionalkontrasten eine hemisphärisch zonalisierte Zirkulation heraus, die je nach Phase der Nordatlantischen Oszillation regionale Antizyklonalanomalien über Nordeuropa (Hauptkomponente 3) bzw. im Bereich Labrador-Grönland (Hauptkomponente 2) beinhaltet. Für Mitteleuropa hat dies im ersten Fall gehäufte Kaltluftzufuhr, im zweiten Fall gehäufte Warmluftzufuhr zur Folge, wodurch selbst bei hemisphärisch zonalisierter Zirkulation ein breites Variabilitätsspektrum konstituiert wird.

Nicht in der vorliegenden Analyse enthalten ist schließlich die denkbare Gegenvariante zu den NAO-Mustern, nämlich eine hemisphärisch abgeschwächte und im Hauptast polwärts verlagerte Zonalzirkulation, wie sie bei generell abgeschwächten Meridionalkontrasten zu erwarten ist. Da dies wahrscheinlich jedoch sowohl eine tropische Abkühlung (rückläufiger H_2O -Effekt) als auch eine polare Erwärmung (rückläufiger Eis-Albedo-Temperatureffekt) erfordert, verwundert es nicht, ein derartiges Zirkulationsmuster nur in speziellen Fallstudien (hier nicht weiter behandelt), nicht aber in umfassenderen Analysen als eigenständiges Grundmuster zu erhalten.

5. Schlußfolgerung

Auf der Grundlage rezenter klimatischer Anomalien konnten für die winterliche Nordhemisphäre verschiedene Zirkulationsmuster herausgearbeitet werden, die sich in aktualistischer Übertragung unterschiedlichen Formen eines global geänderten Klimas zuordnen lassen. Die 'glaziale' Strömungskonfiguration (Hauptkomponente 4) tritt unter heutigen Bedingungen begreiflicherweise nur sehr selten auf. Für die Nordatlantische Oszillation (Hauptkomponenten 2 und 3) zeichnet sich eine Akzentuierung bei begrenzten Verstärkungen des meridionalen Temperaturkontrastes ab, die beispielsweise durch polar konvergierenden stratosphärischen

Vulkanstaub bedingt sein können. Das PNA-artige Zirkulationsmuster (Hauptkomponente 1) erweist sich schließlich als vereinbar mit Erscheinungsformen der rezenten Erwärmung, an der der Mensch durch die Freisetzung von Treibhausgasen zumindest mitbeteiligt ist. Da sich in den Geopotentialfeldern der vergangenen Jahrzehnte bereits eine gestiegene Repräsentanz dieses Zirkulationsmusters nachweisen läßt (*Fig. 4*), liegt es nahe, für den Fall einer weiteren Erwärmung aus dieser gewichtiger werdenden Strömungskonfiguration (*Fig. 3*, Hauptkomponente 1) regionalisierende Aussagen zur wahrscheinlichen Klimaentwicklung abzuleiten.

Die starke räumliche Differenzierung im Zirkulationsgeschehen läßt zunächst erkennen, daß manche generell vermuteten Folgeerscheinungen einer globalen Erwärmung wohl nur in bestimmten Regionen zur Ausbildung gelangen. So zeichnen sich höhere Windstärken vor allem im subtropischen Pazifik und im Bereich von Südgrönland bis Nordeuropa ab, während andere Regionen wie das Innere Nordamerikas oder der Großraum um das Mittelmeergebiet einer gegenläufigen Tendenz unterliegen. Auch bei den Niederschlagsverhältnissen ergibt sich kein einheitliches Bild. Hatten zonal gemittelte Modellsimulationen der Feuchtigkeitsentwicklung für erhöhte CO_2 -Konzentrationen von *Manabe und Wetherald* (1980) noch an eine allgemeine Breitenverschiebung der Luftdruck- und Windgürtel denken lassen, so zeigt Hauptkomponente 1 auch hierbei differenziertere Strukturen. Niederschlagsbezogen bedeuten sie eine Zunahme im Pazifik (vor allem in seinem östlichen Teil) und an der Ostküste Nordamerikas sowie eine Abnahme im Nordwesten und im Inneren dieses Kontinents wie auch im mittleren Nordatlantik. Weiter östlich ergeben sich erhöhte Niederschläge im Bereich der verstärkten Westdrift über Nordeuropa sowie abnehmende Winterregen im Bereich des abgeschwächten Höhentrogos über dem Mittelmeerraum.

Nicht ganz einfach sind dagegen die regionalen Unterschiede im Ausmaß der (unterstellten) Erwärmung abzuschätzen, da z.B. ein dynamisches Hochdruckgebiet mit warmem Kern

durch winterliche Ausstrahlung auch kräftig abkühlen kann. Aber die Advektionsrichtungen am Rande der Steuerungszentren geben doch wertvolle Hinweise: so liegen bei Hauptkomponente 1 die Ostseiten der Kontinente unter Luftmassenzufuhr aus höheren Breiten, während an der Westküste Nordamerikas südliche Strömungen auftreten und Europa stark von atlantischen Luftmassen bestimmt wird. Zusammengenommen bedeutet dies, daß die kontinentalen Westseiten überdurchschnittlich, die kontinentalen Ostseiten unterdurchschnittlich an der winterlichen Erwärmung beteiligt sind und sich somit der thermische West-Ostseiten-Gegensatz noch weiter verstärkt.

Genauere Abschätzungen des zukünftigen Klimas in regionaler Differenzierung lassen sich jedoch erst erzielen, wenn auch Klimamodell-ergebnisse in die empirischen Auswertungen miteinbezogen werden. Hier hat sich ein weiterer Forschungsbereich eröffnet, der auch für die geographische Klimaforschung ein umfangreiches Betätigungsfeld bereithält.

Danksagung:

Die analysierten Gitternetzfelder stammen vom National Center for Atmospheric Research (NCAR) in Boulder (Colorado) und wurden dankenswerterweise vom Deutschen Klimarechenzentrum (DKRZ) in Hamburg kosten- und gebührenfrei zur Verfügung gestellt.

6. Literatur

Angell, J. K. 1986: Annual and seasonal global temperature changes in the troposphere and low stratosphere, 1960-85. - *Monthly Weather Review* **114**: 1922-1930

Bahrenberg, G., E. Giese und J. Nipper 1990: Statistische Methoden in der Geographie, Bd. 1. Stuttgart 1990

Barnston, A. G. and R. E. Livezey 1987: Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. - *Monthly Weather Review* **115**: 1083-1126

Flohn, H. 1969: Ein geophysikalisches Eiszeit-Modell. - *Eiszeitalter und Gegenwart* **20**: 204-231

Flohn, H. 1986: Singular events and catastrophes now and in climatic history. - *Naturwissenschaften* **73**: 136-149

Flohn, H. 1989: Wo bleibt das Erwärmungssignal? Das CO₂-Problem in globaler Sicht. - *Die Geowissenschaften* **7**: 31-37

Flohn, H., A. Kapala, H.R. Knoche and H. Mächel 1990: Recent changes of the tropical water and energy budget and of midlatitude circulations. - *Climate Dynamics* **4**: 237-252

Hense, A., P. Krahe and H. Flohn 1988: Recent fluctuations of tropospheric temperature and water vapour content in the tropics. - *Meteorology and Atmospheric Physics* **38**: 215-227

Horel, J. D. 1981: A rotated principal component analysis of the interannual variability of the northern hemisphere 500 mb height field. - *Monthly Weather Review* **109**: 2080-2092

Houghton, J.T., G.J. Jenkins and J.J. Ephraums (Hrsg.) 1990: Climate Change. The IPCC Scientific Assessment. - Cambridge Univ. Press

Jacobeit, J. 1989: Zirkulationsdynamische Analyse rezenter Konvektions- und Niederschlagsanomalien in den Tropen. - *Augsburger Geographische Hefte* **9**

Knoche, H. R. 1991: Analysis of northern hemisphere circulation patterns and tropospheric temperatures, 1949-89. - *Annales Geophysicae Supplement* to Vol. **9**: C122

Kraus, E. B. 1973: Comparison between ice age and present general circulations. - *Nature* **245**: 129-133

Manabe, S. and R. T. Wetherald 1980: On the distribution of climate change resulting from an increase in CO₂ content of the atmosphere. - *Journal of the Atmospheric Sciences* **37**: 99-118

Miles, M. K. 1975: North Atlantic circulation and associated temperature gradients. - *Proceedings of the WMO/IAMAP Symposium on long-term climatic fluctuations*, Norwich, WMO-No. **421**: 189-196

Mo, K. C. and R. E. Livezey 1986: Tropical-extratropical geopotential height teleconnections during the northern hemisphere winter. - *Monthly Weather Review* **114**: 2488-2515

Perry, A. H. 1990: Western Europe's climate during the 1980's - a comparison with earlier decades. - In: Bradzdl, R. (ed.): Climatic change in the historical and the instrumental periods. - Brno: 219-222

Schlesinger, M. E. 1986: Equilibrium and transient climatic warming induced by increased atmospheric CO₂. - *Climate Dynamics* **1**: 35-51

Schönwiese, Ch.-D. 1991: Das Problem menschlicher Eingriffe in das Globalklima ("Treibhauseffekt") in aktueller Übersicht. - *Frankfurter Geowissenschaftliche Arbeiten, Serie B*, **3**

Wallace, J. M. and D. S. Gutzler 1981: Teleconnections in the geopotential height field during the northern hemisphere winter. - *Monthly Weather Review* **109**: 784-812

Williams, J. 1975: Simulation of the atmospheric circulation with boundary conditions representing those of periods in the past: experiments with the NCAR global circulation model. - *Proceedings of the WMO/IAMAP Symposium on long-term climatic fluctuations*, Norwich, WMO-No. 421: 373-380

Wilson, C. A. and J. F. B. Mitchell 1987: A doubled CO₂ climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean. - *Journal of Geophysical Research* **92** (D11): 13,315-13,343

Yarnal, B. 1985: Extratropical teleconnections with El-Niño/Southern Oscillation (ENSO) events. - *Progress in Physical Geography* **9**: 315-352

Zusammenfassung: Regionale Unterschiede im atmosphärischen Zirkulationsgeschehen bei globalen Klimaveränderungen

Jede globale Klimaveränderung geht mit Umstellungen in der atmosphärischen Zirkulation einher, wodurch der Klimawandel räumlich differenziert wird und somit regionale Auswirkungsunterschiede entstehen. Um dies hinsichtlich der bedingenden Zirkulation zu erfassen, werden tägliche Gitternetzfelder von Bodenluftdruck und 500 hPa-Geopotential während des nordhemisphärischen Winters im Zeitraum 1947-1987 analysiert. Als rezente Repräsentationen eines geänderten Klimas werden die Winter mit positiven oder negativen Anomalien des hemisphärisch gemittelten Meridionalgradienten der 500/1000 hPa-Schichtdicke herangezogen, zugehörige Zirkulationsmuster werden über Hauptkomponentenanalysen der 500 hPa-Geopotentialfelder ermittelt. Unter den vier resultierenden Strömungskonfigurationen erscheint insbesondere ein PNA-artiges ('pazifisch-nordamerikanisches') Zirkulationsmuster als bedeutsam, das mit zahlreichen Phänomenen der rezenten Erwärmung vereinbar ist und im Laufe der letzten Jahrzehnte bereits eine signifikant ansteigende Repräsentanz in den realen Geopotentialfeldern der winterlichen Nordhemisphäre zeigt. Danach ist bei weiterer globaler Erwärmung mit einer Zunahme zyklonaler Aktivität im pazifischen Großraum und an der Ostseite Nordamerikas, mit wachsendem Antizykloneinfluß über Nordwestamerika, dem mittleren Nordatlantik und Zentralasien, mit steigenden

Niederschlägen über Nordeuropa und mit abnehmenden Winterregen im Mittelmeerraum zu rechnen.

Summary: Regional differences in atmospheric circulation patterns during global climate changes

Every change of global climate is accompanied by changes in the atmospheric circulation leading to different effects in different regions of the earth. To determine these differences we have analysed daily grids of sea-level pressure and 500 hPa geopotential height during northern hemispheric winters from 1947 to 1987. As recent examples of changed climatic conditions, winters with positive or negative anomalies of the hemispheric meridional gradient of 500/1000 hPa thicknesses are considered, and corresponding circulation patterns are obtained by the principal components analysis of 500 hPa geopotential height fields. Among the four resulting basic patterns a PNA-like one seems to be especially important, being consistent with many features of the recent warming and indicating a significant increase during the last decades in explaining winter-hemispheric variances of geopotential height fields. Accordingly, continued global warming would be accompanied by intensified cyclonic activity above the Pacific ocean and along the east coast of North America, rising anticyclonic influence above Northwestern America, the midlatitudinal Atlantic and central Asia, increasing precipitation above Northern Europe, and decreasing winter rainfall in the Mediterranean area.

Résumé: Différentiation régionale de la circulation atmosphérique liée aux changements du climat global

Chaque changement du climat global est lié aux changements de la circulation atmosphérique qui résultent dans une différenciation régionale des changements climatiques. A fin de préciser les changements de la circulation atmosphérique, la pression atmosphérique au niveau de la mer et le niveau du géopotentiel 500 hPa sont étudiés à l'aide des quadrillages de chaque jour pour la période de 1947-1987 (pour les mois d'hiver en hémisphère nord). Dans ces données récentes les climats changés sont représentés par des hivers aux anomalies positives ou négatives du gradient méridional moyen (hémisphère nord) de l'épaisseur

de la couche atmosphérique 500/1000 hPa. La circulation correspondante est étudiée par l'analyse des composantes principales des champs de géopotentiel 500 hPa. Parmi les quatre structures de base qui en résultent, celle de type PNA semble être la plus intéressante. Elle va bien avec beaucoup de phénomènes de réchauffement récent, et pendant les décennies passées elle se manifeste de plus en plus dans les champs de géopotentiel de l'hémisphère nord hivernale. D'après ce modèle, un réchauffement continu de l'atmosphère causera une augmentation de l'activité cyclonale dans les régions pacifiques et dans l'est du continent nord-américain ainsi qu'une augmentation de l'activité anticyclonale au nord-ouest de l'Amérique du

Nord, au centre de l'Atlantique du Nord et en Asie centrale. Les précipitations vont augmenter en Europe septentrionale, et les pluies hivernales dans les régions méditerranéennes diminueront.

Manuskripteingang: 14.08.1992

Annahme zum Druck: 20.10.1992

Prof. Dr. *Jucundus Jacobeit*, Geographisches
Institut der Universität Würzburg, Am Hubland, D-
8700 Würzburg